

# Studi Perbandingan Pengendali MRAC dan MRAC-PD pada Pengendalian *Web Tension* pada Sistem *Rewinder Roll*

Ahmad Faizal<sup>1</sup>, Aulia Rahma Jumardi<sup>2</sup>, Ewi Ismaredah<sup>3</sup>, Halim Mudia<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3,4</sup>Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN Suska Riau  
Jl. HR. Soebrantas No.155 Panam, Pekanbaru  
e-mail: <sup>1</sup>ahmad.faizal@uin-suska.ac.id, <sup>2</sup>1655201550@students.uin-suska.ac.id,  
<sup>3</sup>ewi.ismaredah@uin-suska.ac.id, <sup>4</sup>halim.mudia@uin-suska.ac.id

## Abstrak

Dalam setiap industri penting bagi industri tersebut untuk menjaga kualitas produksi barang yang di hasilkan. Contohnya industri kertas, industri ini menghasilkan produk yang menjadi kebutuhan manusia sehari-hari. Oleh karena itu, penting bagi suatu industri kertas agar menjaga kualitas produk yang dihasilkan memiliki mutu produksi yang baik. Berdasarkan studi literatur, penyebab terjadinya kecatatan produksi kertas yang paling dominan yaitu *wrinkle* atau kertas keriput. Kecacatan produksi ini terjadi karena pengendalian ketegangan kertas yang tidak sesuai pada proses yang terjadi di *web tension*. Oleh karena itu untuk menjaga agar kualitas kertas yang di produksi maka di perlukan sebuah pengendali untuk memastikan keakuratan dalam pengukuran ketegangan kertas. Salah satu pengendali yang dapat digunakan pada plant ini yaitu pengendali MRAC, namun pengendali MRAC ini masih menghasilkan respon sistem yang kurang baik pada sistem, maka pengendali ini ditambahkan pengendali PD untuk mendapatkan hasil respon sistem yang lebih baik dimana penentuan model referensi menggunakan metode MIT rule dan penentuan nilai  $K_p$  dan  $K_d$  menggunakan metode heuristik. Hasil penelitian ini menunjukkan pengendali MRAC-PD mampu menghasilkan performansi yang lebih baik dimana pengendali MRAC-PD dapat mengurangi osilasi yang ditimbulkan serta mengurangi overshoot dan menghilangkan Error Steady State yang di timbulkan pengendali MRAC, dimana didapatkan nilai-nilai parameter nya adalah  $E_{ss}=0$  N,  $t_r=0.0958$  detik,  $t_s=0.317$  detik,  $t_d=0.122$  detik,  $M_p=0.0002$  %.

**Kata kunci:** MRAC, PD, *Web Tension*

## Abstract

In every industry it is important for this industry to maintain the quality of the product that are produced. For example the paper industry, this industry produces products that become everyday human needs. Therefore, it is important for a paper industry to maintain the quality of products produced. Based on literature studies, the most dominant cause is wrinkles. This production defect occurs because of paper repair that is not appropriate to the process that occurs on *web tension*. Therefore, to ensure that the quality of the paper produced, a controller is needed to ensure accuracy. One of the controllers that can be used in this plant is the MRAC controller, but this MRAC controller still produces an inferior response system, so this controller is added PD controller to get better response system results when searching for models that use the MIT rule method and selecting  $K_p$  and  $K_d$  values using the heuristic method. The results of this study indicate that the MRAC-PD controller is able to produce better performance where the MRAC-PD controller can reduce the oscillation caused and reduce overshoot and eliminate Steady State Error caused by the MRAC controller, where there are parameter values are  $E_{ss} = 0$  N,  $t_r = 0.0958$  seconds,  $t_s = 0.317$  seconds,  $t_d = 0.122$  seconds,  $M_p = 0.0002\%$ .

**Keywords:** MRAC, PD, *Web Tension*

## 1. Pendahuluan

Industri kertas merupakan salah satu industri yang memiliki potensi besar dalam menunjang perekonomian Indonesia[1]. Oleh karena itu, penting bagi suatu industri kertas agar memastikan mutu kualitas produk yang dihasilkan. Berdasarkan studi literatur, penyebab terjadinya kecatatan produksi kertas yang paling dominan yaitu *wrinkle* atau kertas keriput [2][3]. Kecacatan produksi ini terjadi karena pengendalian ketegangan kertas yang tidak sesuai pada proses yang terjadi di *web tension*.

*Web tension* merupakan sebuah metode yang di gunakan untuk mengontrol ketegangan kertas agar permukaan kertas menjadi rata dan hasil gulungan kertas menjadi padat karena jika

kurangnya keakuratan dalam pengukuran ketegangan tarikan kertas maka dapat menyebabkan kertas putus akibat tarikan terlalu besar atau menyebabkan gulungan kertas menjadi kurang padat (*wrinkle*) akibat tarikan yang terlalu rendah [4]. Oleh karena itu untuk menjaga agar kualitas kertas yang di produksi maka di perlukan sebuah pengendali untuk memastikan keakuratan dalam pengukuran ketegangan kertas [5].

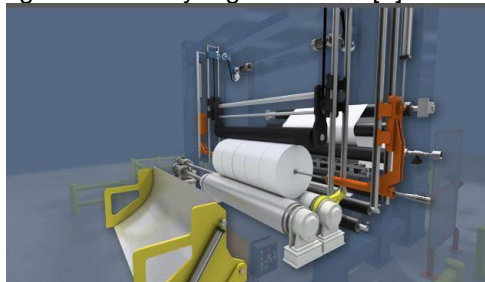
Berdasarkan studi literatur dan hasil simulasi secara *open loop*, *web tension* belum mencapai *setpoint* yang diharapkan. Studi literatur mengenai pengendali juga belum menunjukkan hasil yang memuaskan, karena masih terdapat osilasi. Oleh sebab itu, dipilih pengendali *model reference adaptive control* (MRAC) pada penelitian ini. Dimana pengendali ini memiliki kelebihan mampu beradaptasi dengan perubahan lingkungan sehingga overshoot dapat dikurangi dan performa keluaran sistem dapat mengikuti performa keluaran model referensi yang sudah ditentukan [6]. Namun, berdasarkan hasil uji simulasi pra penelitian yang dilakukan pada pengendali MRAC untuk pengendalian *web tension* pada sistem *rewinder roll* belum didapatkan hasil yang maksimal. Karena berdasarkan hasil uji pra simulasi, sistem mampu mengikuti model referensi yang sudah ditentukan namun, masih terdapat osilasi pada sistem ketika mencapai *setpoint*. Oleh karena itu, pada penelitian ini pengendali *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) akan dikombinasikan dengan mengendali PD.

## 2. Metode Penelitian

Alur penelitian dimulai dengan studi literatur, validasi model matematis, perancangan pengendali, pengujian simulasi dan analisa, dan hasil kesimpulan.

### 2.1 Winder Machine

*Winder machine* merupakan sebuah mesin yang ditempatkan setelah proses di *dryer* untuk memotong gulungan kertas berdiameter besar (*jumbo roll*) menjadi gulungan yang berdiameter lebih kecil [7]. Tahapan-tahapan yang terjadi pada *winder machine* diantaranya *unwind system*, *lead in roll*, *slitter section*, *trim system*, *guide rolls*, *spreader rolls*, *core chuck*, *rider roll*, *ejector and cradle*, *paper core loader*, *safety guard*, dan *threading system* [8]. Pada tahapan-tahapan inilah *web tension* berperan penting untuk memastikan keluaran dari *winder machine* memiliki hasil gulungan yang padat, tidak menimbulkan *wrinkle*, dan seluruh permukaan kertas rata. Hasil akhir dari *winder machine* ini disebut *rewinder roll* dimana, pada *rewinder roll* kertas di gulung kembali dengan diameter yang lebih kecil [7].



Gambar 1. Rewinder Roll

### 2.2 Pemodelan Dinamika Web Tension

Pemodelan dinamika kertas pada penelitian ini mengasumsikan bahwa [9]:

1. Percepatan  $V_1$  pada *lead roll* adalah konstan/tetap
2. Lebar melintang kertas adalah seragam
3. *Strain* /  $\epsilon \ll 1$
4. Kertas elastis
5. Kepadatan kertas tidak ada perubahan yaitu:

$$\rho = \rho_u + 1 \quad (1)$$

Pemodelan dinamika dari kertas adalah sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt}(\rho AL) = \rho_1 A_1 V_1 - \rho AV \quad (2)$$

Dimana:

$\rho$  = Resistivitas

A = Luas Permukaan pada Lembaran Kertas

L = Panjang Kertas  
 V = Kecepatan

Persamaan 2 merupakan neraca massa untuk lebar kertas antara *lead roll* dan *rewinder roll*.  $\frac{d}{dt}(\rho AL)$  menyatakan sebuah perubahan keseluruhan lembar kertas antara *lead roll* dan *rewinder roll* sedangkan  $\rho_1 A_1 V_1 - \rho AV$  menunjukkan neraca material yang masuk ke *lead roll* dan material yang digulung pada *rewinder roll*.

Hukum elastisitas dan persamaan untuk menentukan ketegangan pada *plant* sebagai berikut:

$$\sigma = E\varepsilon + C \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad \sigma = \frac{T}{A} \quad (3)$$

Sedangkan untuk menyatakan tentang *strain*/regangan dan kontinuitas massa dinyatakan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{L - L_u}{L_u} \rho AL = \rho_u A_u L_u \quad (4)$$

Untuk menentukan karakteristik dinamika torsi di daerah *rewinder* maka dengan menggunakan persamaan 3 dan persamaan 4, dapat disederhanakan menjadi satu persamaan sebagai berikut:

$$L \frac{dT}{dt} = EA(V - V_1) + T_1 V_1 - TV + CA \frac{d}{dt}(V - V_1) \quad (5)$$

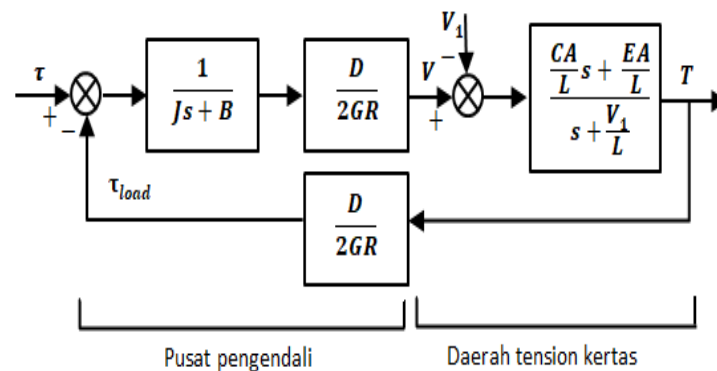
Dimana:

- $\sigma$  = Tegangan pada *Web Tension*
- $\varepsilon$  = Regangan pada *Web Tension*
- L = Panjang Antara *Lead Roll* dan *Rewinder Roll*
- E = Modulus Elastisitas Young pada Kertas
- A = Luas Melintang Kertas
- V = Kecepatan Kertas pada *Rewinder Roll*
- V1 = Kecepatan Kertas pada *Lead Roll*
- C = Modulus Redaman Kertas

Persamaan 4 diatas mencerminkan dinamika domain dari daerah *rewinder* untuk disimulasikan serta dianalisa. Bagian yang dimanipulasi meliputi motor, *gearbox*, dan *rewinder roll*. Dengan menggunakan hukum Newton kedua persamaan *rewinder* adalah:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \tau - \tau_{load} - B\omega \quad (6)$$

Berdasarkan persamaan 5 dan 6, blok diagram *web tension* dapat dilinierisasikan sebagai berikut:



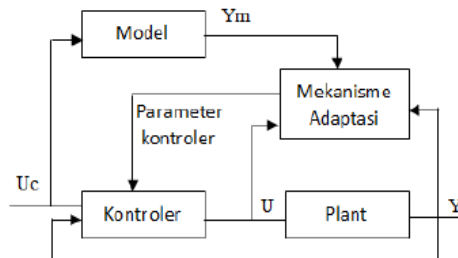
Gambar 2. Diagram Blok *Web Tension* [9]

Berdasarkan blok diagram diatas didapatkan fungsi transfer orde kedua dalam domain-s mulai dari torsi motor sampai *tension* lembar kertas adalah sebagai berikut:

$$\frac{T}{\tau} = \frac{\frac{D}{2GRJL} \frac{EA}{E} (C E s + 1)}{s^2 + \left( \frac{B}{J} + \frac{V_1}{L} + \frac{D^2}{4GR^2 JL} \right) s + \frac{BV_1}{JL} + \frac{D^2}{4GR^2 JL} \frac{EA}{E}} \quad (7)$$

### 2.3 Model Reference Adaptive Controller (MRAC)

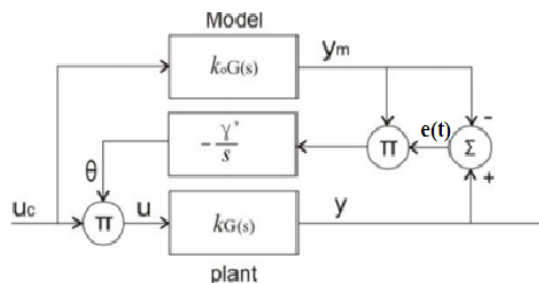
*Model Reference Adaptive Control (MRAC)* merupakan salah satu skema kendali adaptif dimana performansi keluaran sistem (proses) mengikuti performansi keluaran model referensinya dan parameter-parameter pengendali dapat diatur melalui mekanisme pengaturan yang didasarkan pada *error* yang merupakan selisih antara keluaran *plant* dengan keluaran model referensi. Dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 3. Blok Diagram Skema MRAC [6]

### 2.4 MIT Rule

*MIT Rule* adalah salah satu metode yang dipakai pada MRAC selain metode kestabilan lyapunov. Metode *MIT Rule* dipilih karena persamaan matematis yang sedikit dan tidak terlalu rumit. Respon sistem *loop* tertutup ditentukan oleh model yang keluarannya dinotasikan  $y_m$ , *output* proses dinotasikan sebagai  $y$ . *Error* merupakan selisih antara keluaran  $y$  dari sistem *loop* tertutup dan keluaran dari model  $y_m$ . *Error* dinotasikan sebagai  $e$  [10].



Gambar 4. Skema MRAC dengan Metode *MIT Rule* Satu Gain [10]

### 2.5 Pengendali *Proportional (P)* dan *Derivatif (D)*

Kendali *proporsional* berfungsi untuk memperkuat sinyal kesalahan penggerak (sinyal *error*), sehingga akan mempercepat keluaran sistem mencapai titik referensi. Sedangkan kendali *derivative* menyebabkan adanya redaman pada sistem sehingga lebih memperkecil lonjakan [11]. Data pra-desain yang akan digunakan untuk memodel matematis sistem *Rewinder Roll*, adapun nilai parameter yang dipakai dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 1 Parameter *Web Tension* pada *Rewinder Roll* [14]

No.	Parameter	Keterangan	Nilai
1.	D	Diameter Rewinder Roll	1.056 m
2.	GR	Gear Ratio	3
3.	E	Modulus Elastisitas Young pada Kertas	$1719 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
4.	A	Luas Melintang Kertas	$1.72 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
5.	J	Total Inersia pada Motor	$144.967 \text{ kgm}^2$
6.	L	Panjang antara Lead Roll dan Rewinder Roll	5 m
7.	C	Modulus Redaman Kertas	$5 \text{ N sec/m}^2$
8.	B	Koefisien Gesek pada Motor Penggerak	$2.25 \times 10^{-3} \text{ m/rad/sec}$
9.	$V_1$	Kecepatan Kertas Pada Lead Roll	152 m/sec

### A. Perubahan Pemodelan Matematis Ke Fungsi Transfer

Berdasarkan persamaan 7 model fungsi alih sistem *rewinder roll*, dengan memasukkan nilai-nilai parameter yang terdapat pada tabel 1 maka, didapatkan *transfer function* sebagai berikut:

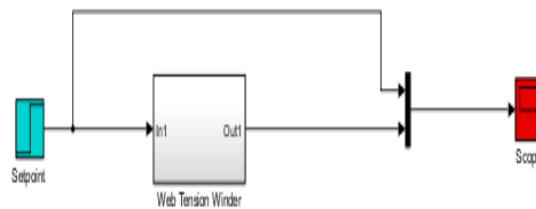
$$\frac{T}{\tau} = \frac{\frac{1.056 \text{ m}(1719 \times 10^6 \text{ N/m}^2) \times (1.72 \times 10^{-3} \text{ m}^2)}{2(3)} \times \left( \frac{5 \text{ N sec/m}^2}{1719 \times 10^6 \text{ N/m}^2} s^{+1} \right)}{s^2 + \left( \frac{2.25 \times 10^{-3} \text{ N m/rad/sec} \times 152 \text{ m/sec}}{144.967 \text{ kgm}^2} + \frac{1.056^2 \times 5 \text{ N sec/m}^2 \times 1.72 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{4(3)^2 \times 144.967 \text{ kgm}^2 \times 5 \text{ m}} \right) s} \quad (8)$$

$$+ \frac{2.25 \times 10^{-3} \text{ N m/rad/sec} \times 152 \text{ m/sec}}{144.967 \text{ kgm}^2} \times \frac{1.056^2 \times 1719 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \times 1.72 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{4(3)^2 \times 144.967 \text{ kgm}^2 \times 5 \text{ m}}$$

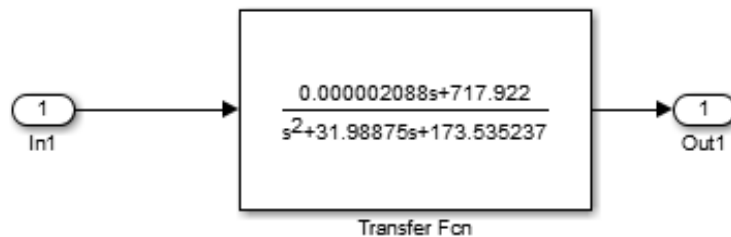
$$\frac{T}{\tau} = \frac{2.088 \times 10^{-6} s + 717.922}{s^2 + 31.9885s + 173.535237} \quad (9)$$

### B. Validasi Model Matematis

Pada blok diagram simulasi dinamika sistem pada unit *Rewinder Roll* akan dimodelkan dalam bentuk single input dan single output, yang mana torsi motor sebagai *manipulated variable (input)* dan *tension* sebagai *process variable (output)*. Seperti yang digambarkan pada gambar berikut:



Gambar 5. Diagram Blok *Open Loop Rewinder Roll*



Gambar 6. Subsistem Blok *Rewinder Roll*

### C. Perancangan Pengendali MRAC

Dalam perancangan pengendali MRAC digunakan skema rancangan pada gambar 4 dengan penentuan model referensi menggunakan metode *MIT Rule*. Karena respon sistem pada penelitian ini merupakan sistem orde dua maka untuk membuat model referensi menggunakan karakteristik orde dua dengan mengikuti berikut:

$$y_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

Untuk memperoleh nilai  $\omega_n$  digunakan nilai sebesar 22.22 [9] dengan nilai  $\zeta = 1$  agar respon model referensi menjadi *Criticaldamp*. Maka fungsi alih model referensinya menjadi:

$$y_m(s) = \frac{493.7284}{s^2 + 44.44s + 493.7284} \quad (11)$$

Selanjutnya adalah merancang pengendali MRAC dengan satu *gain* pada *Rewinder Roll* untuk mendapatkan nilai  $\theta$  Adapun penjabarannya sebagai berikut:

$$y_m = \frac{493.7284}{s^2 + 44.44s + 493.7284} U_c$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{k}{k_0} y_m = -\gamma' y_m e$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\gamma' \frac{493.7284}{s^2 + 44.44s + 493.7284} U_c e$$

$$\theta = \frac{1}{s} - \gamma' \frac{493.7284}{s^2 + 44.44s + 493.7284} U_c e \quad (12)$$

Selanjutnya adalah menurunkan umpan balik adaptif  $\theta$  untuk mendapatkan  $y_{plant}$ .

$$u = \theta u_c \quad (13)$$

$$e = y_{plant} - y_{model} = G_p u - G_m u_c \quad (14)$$

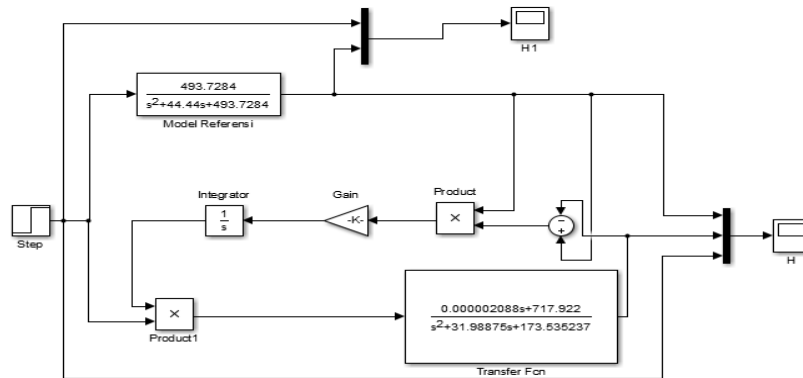
$$y_{plant} = G_p u = \left( \frac{2.088 \times 10^{-6} s + 717.922}{s^2 + 31.9885 s + 173.535237} \right) (\theta u_c)$$

$$y_{plant} = \left( \frac{2.088 \times 10^{-6} s + 717.922 \theta}{s^2 + 31.9885 s + 173.535237} \right) u_c \quad (15)$$

Selanjutnya adalah mencari nilai *error* dengan mengambil turunan parsial *error* dengan nilai  $\theta$ . Nilai  $u_c$  tidak termasuk parameter, karena itu tidak penting saat mengevaluasi turunannya.

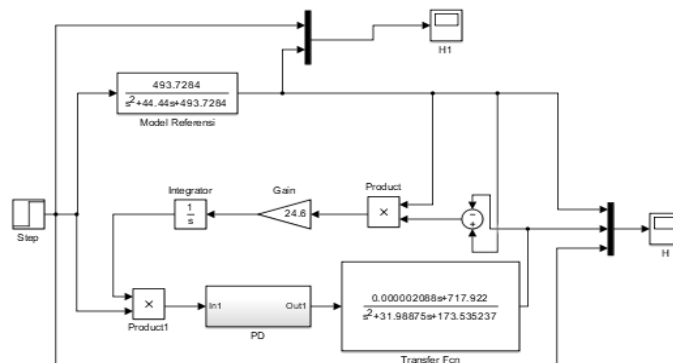
$$e = \left( \frac{2.088 \times 10^{-6} s + 717.922 \theta}{s^2 + 31.9885 s + 173.535237} \right) u_c - G_m u_c \quad (16)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = \left( \frac{2.088 \times 10^{-6} s + 717.922}{s^2 + 31.9885 s + 173.535237} \right) u_c \quad (17)$$

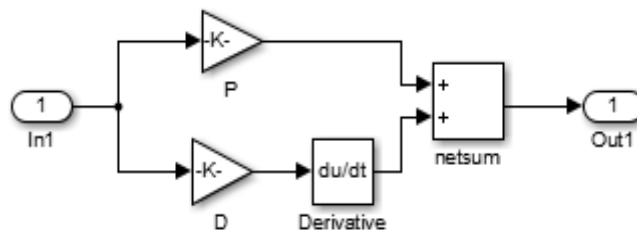


Gambar 7. Rangkaian Simulink Pengendali MRAC

#### D. Perancangan Pengendali MRAC dengan Penambahan PD



Gambar 8. Rangkaian Simulink Pengendali MRAC dengan Penambahan Pengendali PD



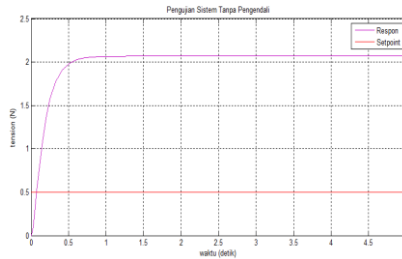
Gambar 9. Subsystem Blok Pengendali PD

Rancangan penambahan pengendali PD pada sistem rewinder roldepat dilihat pada gambar 8 dengan subsystem blok pengendali PD pada gambar 9 dimana rancangan pengendali

MRAC dihubungkan seri antara transfer function sistem rewinder roll dengan pengendali PD kedalam rangkaian.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil Simulasi *Web Tension* Pada Sistem *Rewinder Roll* Secara *Open Loop*



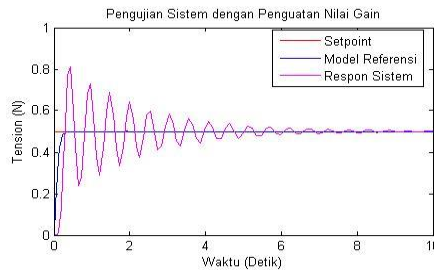
Gambar 10. Respon Simulasi Sistem Secara *Open Loop*

Gambar di atas merupakan hasil respon sistem web tension secara open loop dimana tampilan grafik menunjukkan bahwa respon sistem yang dihasilkan jauh dari setpoint yang diinginkan dengan nilai parameter sebagai berikut.

Tabel 2. Respons Waktu *Web Tension* pada Sistem *Rewinder Roll* Secara *Open Loop*

Analisa Respon	Hasil simulasi
Waktu naik / <i>Rise time</i>	0.061 detik
Waktu tunak / <i>Time Settling</i>	0.075 detik
Waktu tunda / <i>Delay Time</i>	0.047 detik
<i>Maximum overshoot</i>	3.137%
<i>Error steady state</i>	1.5685

#### 3.2 Hasil Simulasi *Web Tension* Pada Sistem *Rewinder Roll* menggunakan pengendali MRAC



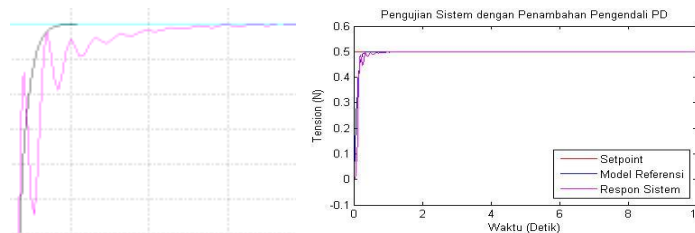
Gambar 11. Hasil Respon Pengendali MRAC pada Sistem *Rewinder Roll*

Gambar di atas merupakan hasil respon sistem web tension dengan pengendali MRAC dimana tampilan grafik menunjukkan bahwa respon sistem memiliki osilasi pada sistemnya dengan nilai parameter sebagai berikut.

Tabel 3. Respons Waktu *Web Tension* pada Sistem *Rewinder Roll* dengan Pengendali MRAC

Analisa Respon	Hasil simulasi
Waktu naik / <i>Rise time</i>	0.15 detik
Waktu tunak / <i>Time Settling</i>	0.28 detik
Waktu tunda / <i>Delay Time</i>	0.221 detik
<i>Maximum overshoot</i>	0.62 %
<i>Error steady state</i>	0.03

#### 3.3 Hasil Simulasi Pengaruh Penambahan Pengendali PD pada Pengendali MRAC



Gambar 12. Hasil Respon Pengendali MRAC dengan Penambahan Pengendali PD

Gambar di atas merupakan hasil respon sistem dengan web tension pengendali MRAC dengan penambahan pengendali PD dimana tampilan grafik menunjukkan pengendali PD berpengaruh dalam mengurangi osilasi yang di timbulkan pengendali MRAC serta overshoot yang ditimbulkan pun berkurang dan menghilangkan *error steady state* dengan nilai parameter sebagai berikut:

Tabel 4. Respons Waktu Pengendali MRAC dengan Penambahan Pengendali PD

Analisa Respon	Hasil simulasi
Waktu naik / <i>Rise time</i>	0.0958 detik
Waktu tunak / <i>Time Settling</i>	0.317 detik
Waktu tunda / <i>Delay Time</i>	0.122 detik
<i>Maximum overshoot</i>	0.0002 %
<i>Error steady state</i>	0 N

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa respon sistem yang telah dilakukan pada penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa pengendali MRAC-PD mampu menghasilkan respon sistem yang lebih baik dibandingkan menggunakan pengendali MRAC saja dimana *Rise time* sistem yang dihasilkan lebih cepat 0.0958 detik, *overshoot* berkurang 0.0002 % dan menghilangkan *error steady state*.

#### Daftar Pustaka

- [1] Kemenperin. "Potensi Industri Pulp dan Paper" tentang potensi Indonesia. 19 Oktober 2016. <<https://kemenperin.go.id/artikel/16331/Industri-Pulp-dan-Kertas-Berpotensi-Tumbuh-Signifikan-->> [diakses pada tanggal: 26 Oktober 2019]
- [2] Yudianto, dkk. "Penerapan Metode Statistical Process Control Dalam Mengendalikan Kualitas Kertas Bobbin (Studi Kasus: PT. Pusaka Prima Mandiri)". Universitas Islam Sumatera Utara, 2018.
- [3] Suparto, dkk. "Analisa Kualitas Produk di PT. Surabaya Meka Box Ltd Dengan Metode Six Sigma dan FMEA" Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, 2018
- [4] Yusuf, Awan. "Pengendalian Kualitas Produk Kertas pada paper and Board Manufactured PT. Surya Pamenang Kediri dibagian Konverting" 2006
- [5] Hwang, Hyeongjin, dkk. "Kalman-Filter-Based Tension Control Design for Industrial Roll-to-Roll System" Graduate School of Mechanical Engineering, Yeungnam University Korea, 2019
- [6] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "*Adaptive control*", 2nd ed., Dover Publications, New York. 1995.
- [7] Izzah, Nailul. "Prose Produksi Pulp dan Kertas" tentang Pulp dan Kertas. 21 Februari 2018. <<https://warstek.com/2018/02/21/pulp/>> [diakses pada tanggal: 28 Oktober 2019]
- [8] Handbook. "Impas Goes to Magang" tentang Proses Pembuatan Kertas. <<http://impas-itsb.blogspot.com/2018/06/impas-goes-tomagang.html>> Institut Teknologi dan Sains Bandung. [diakses pada tanggal: 3 November 2019].
- [9] Biyanto, Totok R. "Sistem Pengendalian *Web tension* Menggunakan Kontroler *Robust* PID", Fakultas Teknologi Industri Universitas Kristen Petra, 2005
- [10] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "*Adaptive control*", 2nd ed., Dover Publications, New York. 1995.
- [11] Ali, Muhammad. "Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol PID dengan *Software* Matlab. Universitas Negeri Yogyakarta, 2004.